

# 당뇨병 환자의 혈당 변동에 대한 시스템다이내믹스 모델 개발\*

## Development of System Dynamics Model for the Variation of Plasma Glucose Levels in Patients with Type 2 Diabetes

최은옥\*\* · 곽찬영\*\*\*

Choi, Eun-Ok\*\* · Kwak, Chan-Yeong\*\*\*

### Abstract

The purpose of this study was to develop a system dynamics model for management of glucose metabolism disorders that demonstrated dynamic relationships between insulin and plasma glucose levels over the time. The model was developed to 1) represent the physiology of glucose metabolism for an normal adult subject, 2) to draw causal loop diagram that demonstrate feedback systems of glucose regulation in normal condition and pathologic condition of the type 2 diabetes, 3) to develop an interactive computer simulation model for management of glucose metabolism disorders.

The simulation results showed the plasma glucose level for normal persons varied from 75 to 140 which was consistent with clinical findings. As an example for patients we selected a case which varied from 110 to 310. Two types of interventions were chosen to review the model; meal control and insulin administration. The simulation results for those cases also matched well with clinical findings.

The developed model can be used as an effective educational tool for patients to develop healthy lifestyle choices. The results also provide a blueprint for health providers to maintain normal blood glucose levels in diabetes patients.

**Keywords:** 제2형 당뇨병, 포도당, 인슐린, 시스템다이내믹스

(Type 2 Diabetes, Glucose, Insulin, System Dynamics)

\* 이 논문은 인제대학교 학술연구비재단의 학술연구비 지원에 의한 것임.

\*\* 인제대학교 간호학과 부교수, 노인건강전략개발연구소 연구원 (제 1저자, [nurceo@inje.ac.kr](mailto:nurceo@inje.ac.kr))

\*\*\* 고려대학교 간호대학 부교수 (공동저자, [chanyeong@gmail.com](mailto:chanyeong@gmail.com))

## I. 서론

인슐린의 동화작용으로 포도당, 지방산, 아미노산을 저장한다. 인슐린이 과다하면 저혈당을 초래하여 생명을 잃을 수도 있으며 부족하면 고혈당을 초래한다. 인슐린이 절대적으로 혹은 상대적으로 부족할 때 당뇨병을 유발한다(Ganong, 2008).

혈장 포도당 수준과 포도당 부하에 대한 혈장 인슐린 반응에 대한 역동적 변화를 조사한 연구에서 정상인의 공복 혈당은  $88.1 \pm 1.7 \text{mg}/100\text{ml}$  범위였으며 포도당 50g 부하 30분 후  $131.0 \pm 6.2 \text{mg}/100\text{ml}$  로 가장 최고 혈당을 보였고 2시간 이내에 초기 혈당치로 환원하였다. 정상인의 포도당 부하에 대한 혈장 인슐린 반응은 기저값  $6.8 \pm 1.6 \mu\text{U}/\text{ml}$ 에서 30분 후에 가장 최고치인  $40.4 \pm 4.4 \mu\text{U}/\text{ml}$  를 보였다. 반면 당뇨병 환자에서는 식후 1시간 후의 혈당치가 최고치를 보였다. 중등도 및 중증의 당뇨병 환자에서 당내성 및 고혈당 수준이 악화하였으며, 혈장 인슐린 반응은 경증 및 중등도에서 당부하 90분 후 최고치를 보였으며 경증의 당뇨병에서( $26.8 \pm 6.5 \mu\text{U}/\text{ml}$ , 중등도 당뇨병에서 ( $23.5 \pm 4.2 \mu\text{U}/\text{ml}$ ))를 보였다. 반면 중증에서는 포도당 부하에 대한 혈장 인슐린 반응은 무반응이었음을 발표하였다(Sakai, Ohneda, Nihei & Kobayashi, 1982).

Gaetano와 Arino (2000)는 역동적 단일 체계로 인슐린-당 평형상태에 관한 연구로 통합된 모델을 발표하였으며 Silber, Jauslin, Frey 등(2007)은 포도당 정맥 주사 후의 정상인과 제2형 당뇨병 환자의 혈장 포도당과 인슐린 조절에 관한 통합 모델을 발표하였다.

이상의 연구 결과에서 포도당을 부하한 후 혈장 인슐린 반응 및 혈장 포도당 수준의 관련성에 관한 임상시험 결과를 모델링하는 연구가 진행되었음을 알 수 있다. 또한 UKPDS 연구 등을 통해 정상적인 혈당 범위의 조절과 혈압 조절을 통해 당뇨병 환자의 신질환 등 만성 합병증을 예방할 수 있다는 연구결과가 발표되고 있다. 따라서 미국 당뇨병 학회에서는 당뇨병 환자의 혈당 개선과 만성 합병증의 예방이라는 치료 목표를 세우고 인슐린 강화요법, 식사요법, 운동요법 등의 실무 가이드라인을 제시하고 있다 (American Diabetes Association, 2008).

당뇨병은 만성 질환이므로 장기간의 자기관리가 필요하다. 따라서 환자 스스로 자기관리를 지속하도록 동기화하는 행위의 변화를 목적으로 하는 교육이 필요하다. Golin, Dimatteo와 Gerberg(1996)는 환자 행위의 지속성이 중요 요소인데 환자 자신이 치료방침을 이해하여 자신의 생활양식에 부합되는 당뇨병 관리방식을 선택함으로써 지속적인 행위를 유도할 수 있으며 스스로 결정하기 때문에 만족감도 높아진다고 보고하였다. 따라서 수학적 모델링을 통해 이러한 자기관리 행위 결정에 도움을 줄 수 있도록 수학적 모델링을 개발하는 것은 중요한 의미가 있는 연구라고 하겠다.

본 연구의 목적은 시스템다이내믹스 모델을 개발함으로써 혈당 조절이라는 생리적 결과에 대한 피드백으로 환자의 자기관리 행위를 강화할 수 있음을 가정하고 인체의 체계 내의 상호작용에 의한 피드백 기전을 시뮬레이션 한다는 점에서 위의 선행연구들에서의 경구 당부하 혹은 인슐린 투여에 대한 인체의 인슐린-혈장 포도당 반응 관련 임상시험 모델링과는 구별되는 연구라고 하겠다. 즉, 본 연구의 시뮬레이션 결과에서 정상인 및 제 2형 당뇨병 환자의 탄수화물 섭취 조절, 인슐린 투여 등의 자기관리행위에 따른 인체 체계내의 생리적 기전으로 인한 혈당 수준의 변화 결과에 대한 피드백을 실제 그래프로 제시함으로써 당뇨병 자기관리 행위의 유지라는 행위변화 전략이 가능함을 전체로 시뮬레이션을 하고자 한다. 또한 개인 고유의 시스템다이내믹스 모델링을 통해 개인의 고유한 모델을 알고 대처를 통한 자기관리 행위의 유지 지속 효과와 혈당 개선의 효과를 검증하는 임상실험 연구의 기초 자료를 제시한다는 점에서도 본 연구의 의미를 찾을 수 있다.

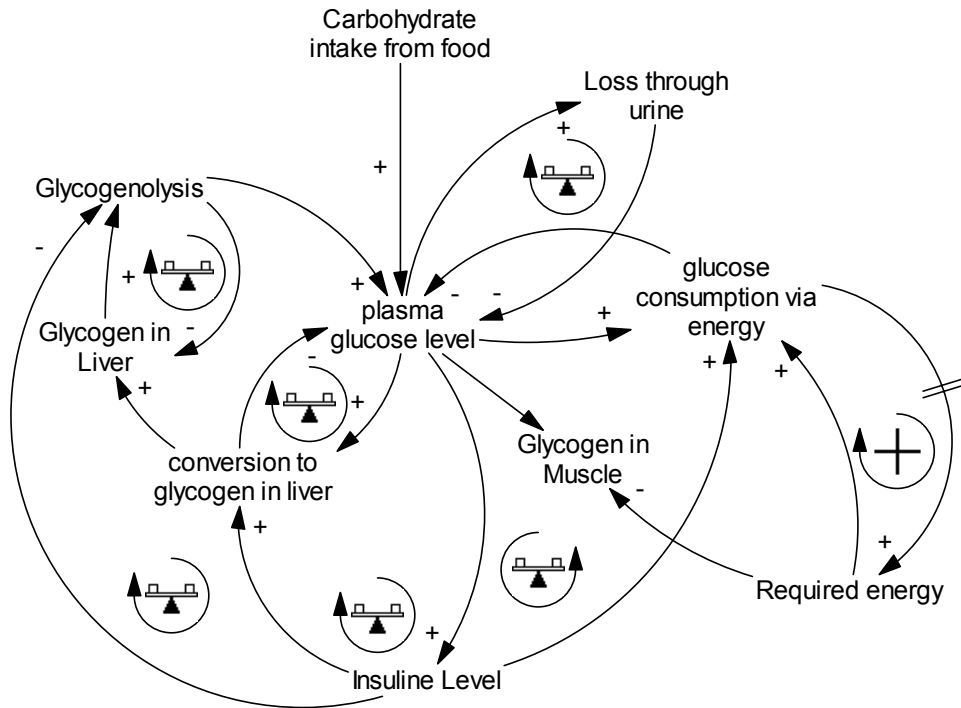
이러한 연구 목적을 위해 실제의 포도당 섭취 및 혈당 반응 자료와 이론적 자료를 근거로 시뮬레이션 하여 시스템다이내믹스 모델을 개발하고자 한다. 섭취한 탄수화물, 장에서 흡수한 포도당, 포도당의 세포내에서의 이용, 포도당의 간에서의 글리코겐으로의 저장, 글리코겐의 혈장 포도당으로의 전환 등에 관한 인지모델을 구성하고 당뇨병 환자의 식사 후 포도당 수준의 변화, 식사량 및 간식의 시간 간격 조절에 의한 혈장 포도당 수준의 변화, 인슐린 투여에 의한 혈장 포도당 수준의 변화, 식사 및 인슐린 투여에 의한 혈장 포도당 수준의 변화에 관한 시스템다이내믹스 모델링을 통해 당뇨병 환자의 합병증 예방을 위한 최선의 방어인 정상 범위의 혈장 포도당 수준 유지(American Diabetes Association, 2008)가 가능함을 제시하고 실제에서 응용하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## II. 모델

### 1. 인과지도 작성

음식물로 섭취한 탄수화물, 내분비 호르몬인 인슐린, 그리고 혈당 수준과의 역동적 관계를 나타내는 혈당조절에 관한 인과지도를 그리면 아래의 그림(Fig. 1)과 같다. 인슐린은 식사를 하거나 공복 상태에서도 혈당 수준을 정상으로 유지하여 평형상태를 이룬다. 그 기전은 공복 상태와 저혈당에 반응하여 인슐린의 분비가 억제되고 간 및 근육에서 포도당의 섭취(uptake)를 줄임으로써 혈당을 정상 수준으로 유지한다(Jameson, 2008). 또한 식사 시 섭취한 탄수화물이 소화되고 장에서 혈중 포도당으로 흡수되어, 혈중 포도당 농도가 높아지

면 인슐린이 분비되고 인슐린에 의해서 포도당의 세포내 이동을 촉진하게 되고, 세포에서 필요로 하는 에너지로 이용한다(Ganong, 2008). 또한 인슐린은 간과 근육에서 포도당을 글리코겐으로 전환하는 기능을 함으로써 혈당조절에 관여를 한다. 즉 간 및 근육이 저장소이며 따라서 혈당이 평형상태를 유지하게 된다. 이러한 과정의 생리적 피드백 기전을 아래와 같은 인과지도로 나타낼 수 있으며 (Fig. 1), 시스템 다이내믹스를 이용한 비만인의 에너지 균형 모델(이순희, 2003)을 참고하였다. 또한 인슐린은 간에서 지질 및 단백질을 합성한다 (Ganong, 2008). 본 인과지도에서는 혈장 포도당-인슐린의 반응을 중심으로 설명하였다.

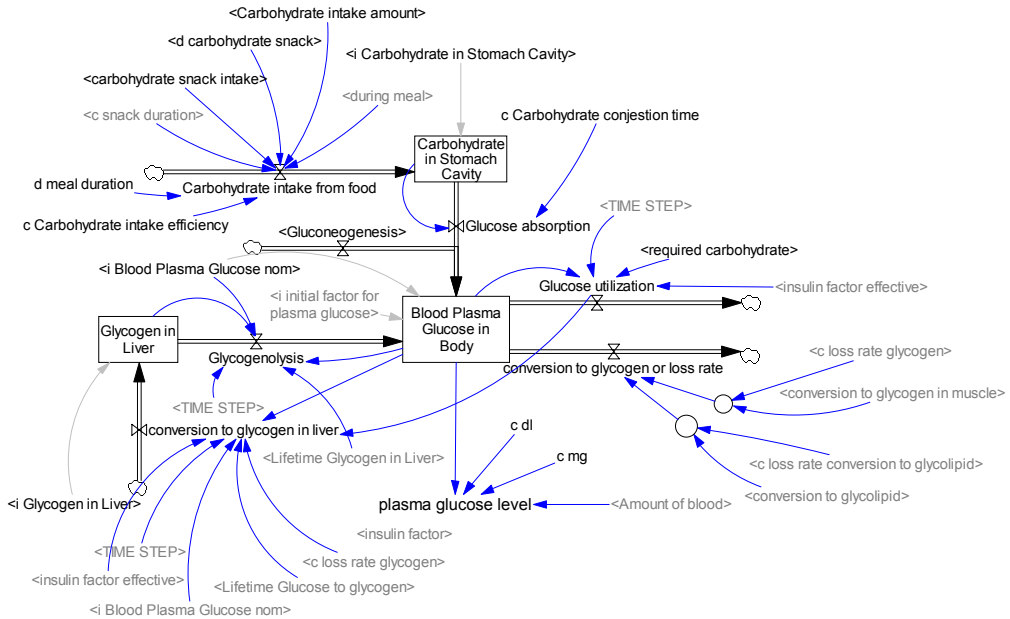


[Fig. 1] Conceptual Mapping of plasma glucose levels (혈당과 관련된 인과지도)

포도당-인슐린 반응에서 인슐린의 기능이 매우 중요한데, 위의 인과지도에서 제시하였듯이 혈당과 관련되어 직접적인 음의 순환고리를 형성하여 정상 혈당 수준을 유지하고 조절한다. 당뇨병 환자는 이 음의 순환고리에 문제가 발생하여 인슐린이 분비되지 않거나 제 기능을 발휘하지 못하여 혈당이 비정상적으로 높다.

## 2. 저장유량도

다음 그림은 혈당과 관련된 저장유량도로서 그림에서 보듯이 혈당량 (Blood Glucose in Body), 탄수화물 섭취(Carbohydrate in Stomach) 및 간에 글리코겐으로 저장(Glycogen in Liver) 등 3 개의 레벨 변수를 중심으로 이루어졌다(Fig. 2 참조).



[Fig. 2] 수치에 대한 저장유량도

### 1) 탄수화물의 섭취

탄수화물을 음식물로 섭취하여 소화하고 포도당으로 흡수한다. 정상적인 식사로 아침, 점심, 저녁 식사를 하는 환자와 정상인에서 간식도 하루에 세 번 제공하는 시나리오 구성을 설정하였다. 따라서 하루에 필요한 탄수화물을 6회로 나누어 섭취할 수 있도록 하였으며, 기준 이 되는 시나리오로는 정식 식사만 세 번 (6시, 12시, 18시)하는 것으로 가정하였다. 섭취된 탄수화물은 일단 위속에 저장되며 시간을 두고 (한시간 정도) 소화되는 것으로 가정하였으며, 모두 소화되지 않고 약 98% 정도만 소화, 흡수되는 것으로 가정하였다.

### 2) 혈장 포도당 (plasma glucose)

혈장 포도당은 섭취한 탄수화물의 소화 및 흡수, 포도당신합성(Gluconeogenesis), 글리코

겐분해(Glycogenolysis) 등에 의해 영향을 받는다. 포도당의 평형상태를 유지하기 위해 인슐린이 중요한 역할을 한다. 인슐린은 포도당을 세포로 이동시키고 에너지원으로 이용하며 간에 글리코겐으로 저장함으로써 혈당의 평형상태를 유지하게 된다. 혈당이 높으면 인슐린이 분비되어 혈당을 전환시키는 작용을 돕는다. 당뇨병 환자는 인슐린이 절대적으로 혹은 상대적으로 부족하여 고혈당을 보인다.

### 3) 글리코겐(glycogen)

혈장 포도당이 높으면 인슐린이 작용하여 글리코겐 형태로 간이나 근육에 저장한다. 이 중 간에 저장된 글리코겐은 다시 글리코겐분해를 통해서 혈중 포도당으로 변환하고 에너지로 사용된다. 이 두 변환은 혈장 포도당 수준의 평형을 유지하기 위해 혈장 포도당이 낮을 경우는 글리코겐분해가 일어나고 혈장 포도당이 높게 되면 글리코겐으로 변환되는 과정이 지배하게 된다. 즉, 식사 후에는 글리코겐으로 변환이, 공복 시 즉 밤 동안 그리고 아침 식사 전에 혈장 포도당 수준이 낮아지면 글리코겐분해가 주로 일어나게 된다.

## Ⅲ. 시뮬레이션 결과

개발된 시스템다이내믹스 모델을 이용하여 당뇨병 환자의 치료에 관한 연구를 위해 다음과 같은 시나리오를 준비하였다.

- 정상인 (Normal)
- 당뇨병 환자 (Patient)
- 당뇨병 환자 / 식사 요법 (간식을 제공함으로써 탄수화물 섭취 량 조절을 하는 식사요법: Food Control BF, Food Control LC, Food Control DN, Food Control ALL)
- 당뇨병 환자 / 인슐린 주사 (Insulin 06, Insulin 11, Insulin 18)
- 당뇨병 환자 / 식사 요법 / 인슐린 주사 (Comb 06 BLD)

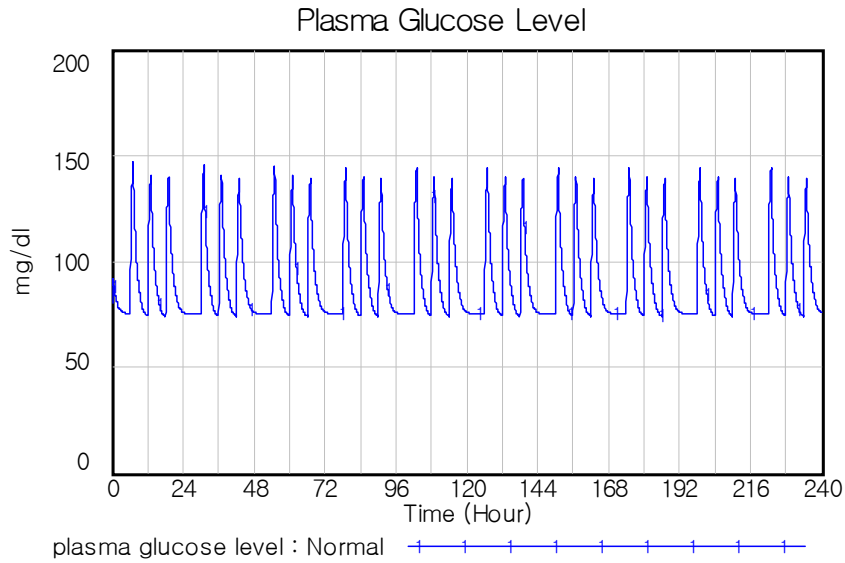
아래 표는 이상의 시나리오에 대한 자세한 정의이다.

[표 1] 시나리오 정의

시나리오	인슐린 기능	식사 조정			인슐린 주사 시간	비고
		아침 식사	점심 식사	저녁 식사		
Normal	100%	한번	한번	한번	없음	
Patient	15%	한번	한번	한번	없음	
Diet Control BF	15%	아침과 점심 식전에 간식 제공	한번	한번	없음	간식을 통한 탄수화물 섭취 조절
Diet Control LC	15%	한번	점심과 저녁 식전 간식 제공	한번	없음	
Diet Control DN	15%	한번	한번	저녁과 자기 전 간식 제공	없음	
Diet Control ALL	15%	아침과 점심 식전 간식 제공	점심과 저녁 식전 간식 제공	저녁과 자기 전 간식 제공	두번	
Insulin(N PH) 06	15%	한번	한번	한번	06 시(아침 식전) 투여	중간 작용형 인슐린 투여
Insulin(N PH) 11	15%	한번	한번	한번	11 시(점심 식전) 투여	
Insulin(N PH) 18	15%	한번	한번	한번	18 시(저녁 식전)	
Comb 06 BLD	15%	두번	두번	두번	식사+간식 3회 제공 및 06 시 (아침 식전)인슐린 투여	혼합(식사 조절 및 아침 식전 인슐린 투여)

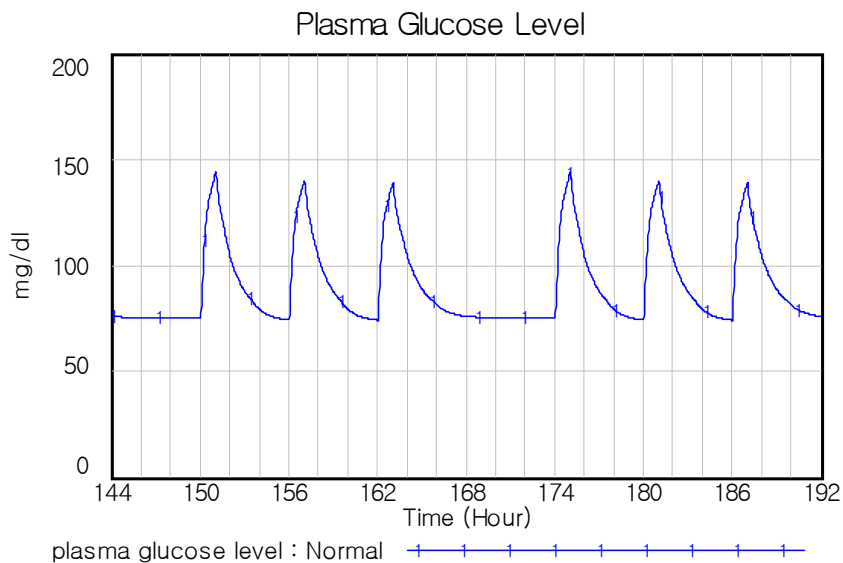
### 1. 정상인의 시뮬레이션 결과

아래의 그림 (Fig. 3)은 정상인(Normal)에 대한 시뮬레이션 결과이다. 정상 인슐린 분비 자료를 근거(WHO & International Diabetes Center, 2007, page 4-2)하였으며, 정상인에서의 혈장 포도당 수준이 식사 전 70mg/dl 에서 식사 30분 후 140 mg/dl 범위로 하여 그림에서 보는 바와 같은 시뮬레이션 결과를 구할 수 있었다. 저녁 식사 이후 아침 식전의 공복에는 간에 저장된 글리코겐에서 포도당으로 전환하여 혈당을 정상 수준으로 유지하고 있다.



[Fig. 3] Simulation Results for Plasma Glucose Levels in Normal Person

초기 값 선정의 오차로 인한 문제를 최소화하기 위해 그림(Fig. 4)과 같이 균형 상태를 충분히 이룬 144시부터 192시까지 2일간의 자료만 논의의 대상으로 하기로 한다. 이 그림을 이들간의 변화를 나타내면 다음의 그림 (Fig. 4)와 같다.

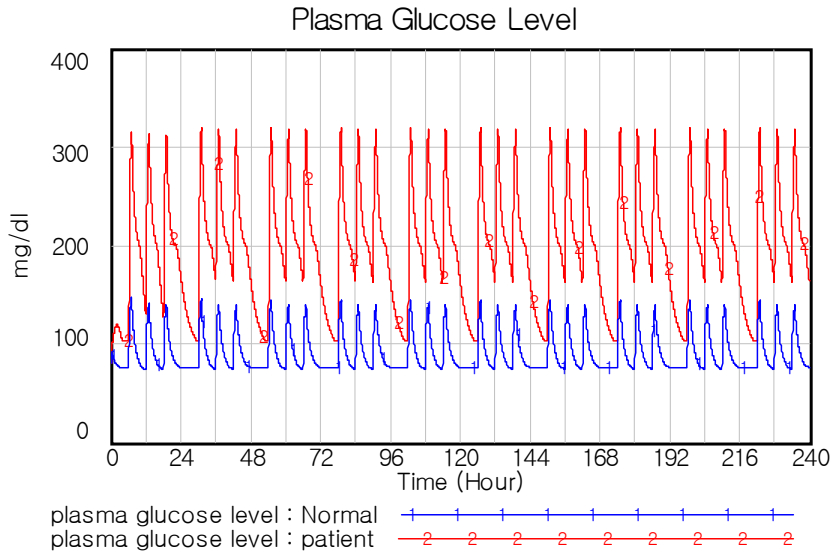


[Fig. 4] Simulation Results for Plasma Glucose Levels in Normal Person during Two days (from 144 Hours to 192 Hours)



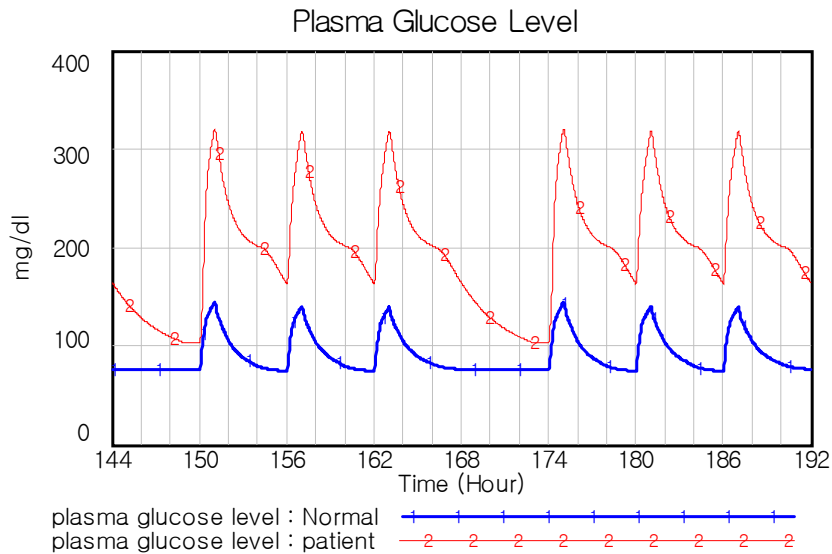
## 2. 치료 전 당뇨병 환자에서의 시뮬레이션 결과

당뇨병 환자에서 혈당 수준은 중증도에 따라 다르겠지만 제1형 당뇨병 환자의 24시간 연속 혈당 측정 결과 그래프 (대한당뇨병학회, 2007, page 5-4)를 근거로 하여 24시간 혈당 수준이 식전 100mg/dl 에서 식후 320mg/dl 까지의 변동을 보여주는 치료 전의 당뇨병 환자 군에 대한 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타냈다(Fig. 5 참조). 미국 당뇨병 학회의 당뇨병 진단기준은 공복 혈당 126mg/dl 이상으로 하고 있으며 본 시뮬레이션에서 최저 혈당치인 100mg/dl 는 어느 정도의 오차가 작용하였음을 가정할 수 있으며 변수를 추가하여 시뮬레이션 모델을 정교화 할 필요가 있음을 보여 준다. 아래 그림 (Fig. 5)는 정상인(Normal)과 치료 전 당뇨병 환자(Pre-treatment Diabetes Patient)의 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다.



[Fig. 5] Comparison of the Simulation Results for Plasma Glucose Levels between Normal Person and Pre-treatment Diabetes Patients

그림에서 초기 40시간 이전의 변화 형태와 그 이후의 형태가 다소 차이가 있는데 이는 환자에서 초기 값을 정상인 사람과 같은 값을 모델에서 갖고 있기 때문에 발생한 초기의 일시적인 문제 (initial transient problem) 때문으로 이러한 논점의 혼란을 피하기 위해 전술한 바와 같이 144 시에서 192 시까지 이들에 걸친 변화량만 살펴보기로 한다.

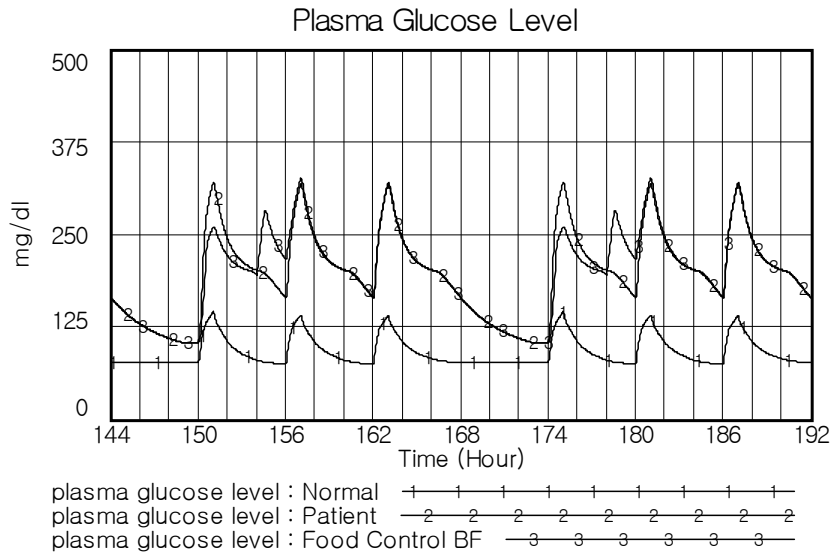


[Fig. 6] Comparison of the Simulation Results for Plasma Glucose Levels between Normal Person and Pre-treatment Diabetes Patients during Two days (from 144 Hours to 192 Hours)

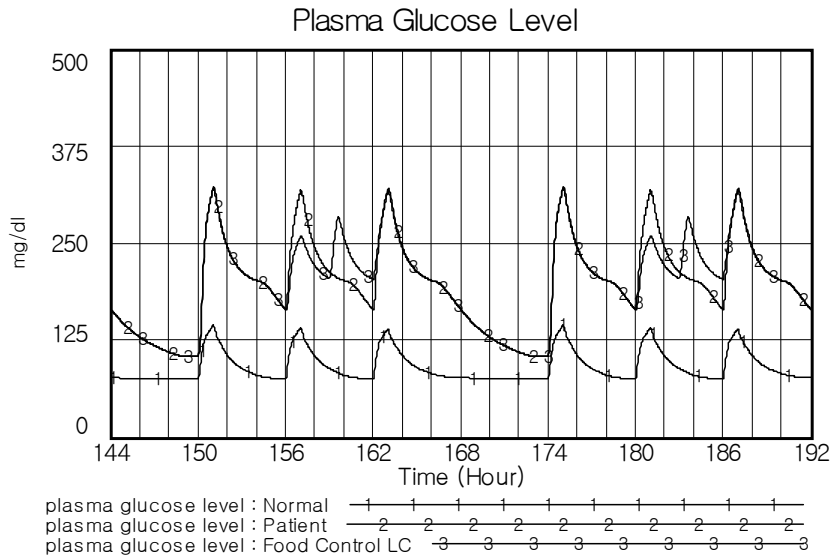
### 3. 당뇨병 환자에서 식사 조절에 의한 혈당 변화의 시뮬레이션 결과

이 연구에서 음식 조절은 매끼 식사와 식간의 간식 제공으로 총 여섯 번에 나누어서 탄수화물 섭취를 조절하는 식사요법으로 가정하였다. 가령, 아침식사 조절 (Food Control BF)의 경우에는 아침 식사 6시 및 10시 간식으로 나누어 섭취하는 것이며, 점심식사 조절 (Food Control LC)의 경우는 12시 점심 식사 및 15시 간식 섭취를 통한 탄수화물 섭취의 조절, 그리고 저녁식사 조절 (Diet Control DN)은 18시 저녁 식사 및 20시에 간식을 통한 탄수화물 섭취를 같은 양을 나누어 섭취하는 것으로 가정하였다. 세끼의 식사 및 3회의 간식을 통한 탄수화물 섭취 조절을 하는 경우(식사조절 Food Control ALL)는 여섯 번에 걸쳐 탄수화물 섭취를 조절하는 식사 요법을 하는 경우이다.

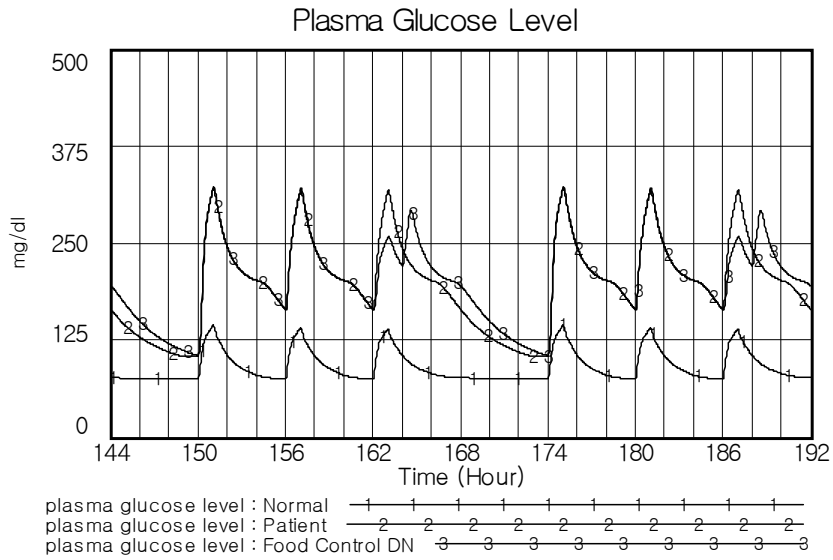
이러한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 정상인과 비교하여 아래 그림 (Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig.10)에 도시하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 탄수화물 섭취를 식사 및 간식으로 나누어 섭취함으로써 식후 혈장 포도당 수준을 최고치 320mg/dl 을 보이던 수준에서 250~300mg/dl 수준으로 최고치 혈당을 낮출 수 있음을 나타내고 있다.



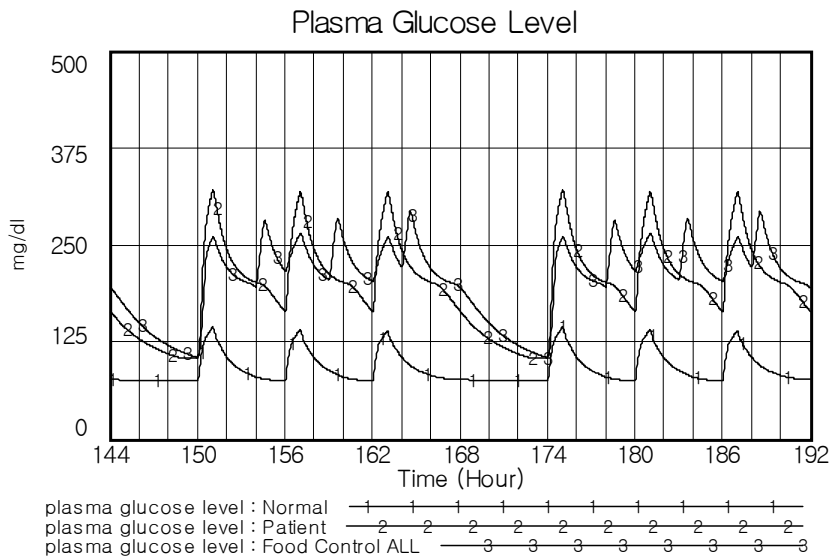
[Fig. 7] Simulation Results under the Condition of Diet Control BF  
 (시뮬레이션 결과: 아침 식사 조절)



[Fig. 8] Simulation Results under the Condition of Diet Control LC  
 (시뮬레이션 결과: 점심 식사 조절)



[Fig. 9] Simulation Results under the Condition of Diet Control DN  
(시뮬레이션 결과: 저녁 식사 조절)

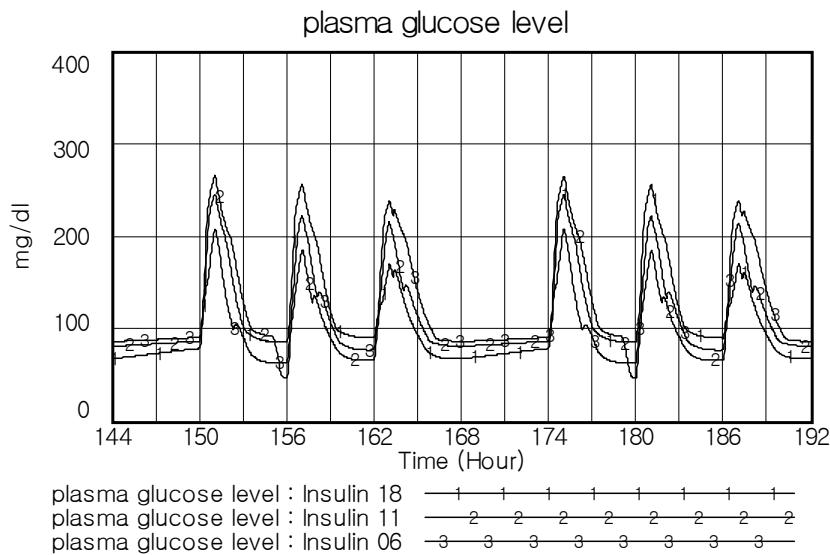


[Fig. 10] Simulation Results under the Condition of Diet Control  
(3 times meal and 3 times snack)  
(시뮬레이션 결과 : 식사 3회 및 간식 3회 제공)

#### 4. 당뇨병 환자에서 인슐린 주사로 치료하는 경우의 시뮬레이션 결과

인슐린 주사는 하루에 한번 투여하는 것으로 가정하고 시나리오를 준비하였다. 다음의 그림( Fig. 11)은 6시, 11시, 18시에 한번 씩 인슐린 주사를 맞는 경우를 비교하였는데, 아침 6시에 인슐린을 투여한 경우 최고의 혈당 수준이 200mg/dl 이하로 낮아지는 결과를 보이는 것으로 나타났다.

인슐린 주사 제제인 합성 인슐린은 속효성, 중간 작용형, 지속형으로 구분하는데 본 연구에서는 중간 작용형 인슐린(NPH)의 작용 시작 시간(30분)과 최고 효과를 나타내는 시간(5-6시간), 그리고 약효 지속 시간(10-16시간) 등을 적용하여 시뮬레이션 하였다 (WHO & International Diabetes Center, 2007, page 4-2 & 4-3).

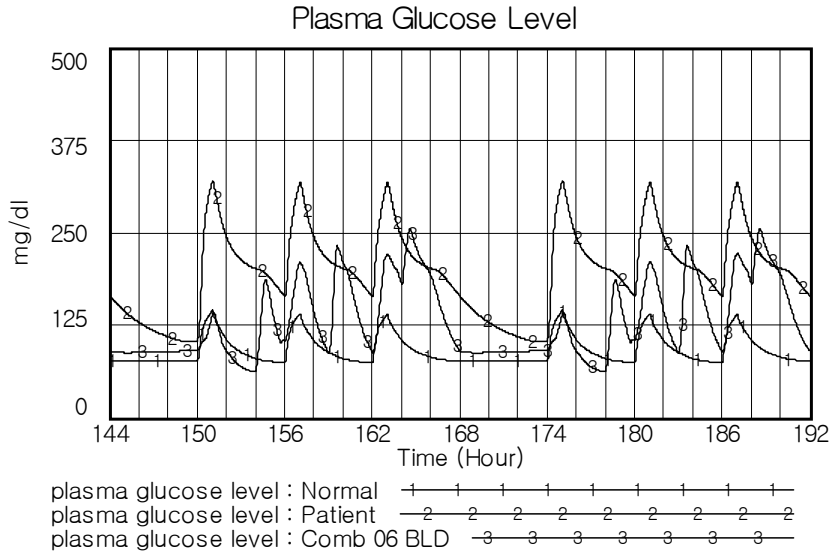


[Fig. 11] Simulation Results of the Administration of NPH Insulin (at 06 Hr. vs 11 Hr. vs 18 Hr.)

#### 5. 당뇨병 환자에서 식사 요법(식사 량 및 식사 회수 조절) 및 인슐린 주사를 한 경우의 시뮬레이션 결과

시스템다이내믹스 모델은 시나리오의 조합을 통하여 목표로 하는 가장 좋은 결과를 규명할 수 있다. 식사 조절과 인슐린 주사 1회 투약하는 병합 치료요법에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 다음 그림 (Fig. 12)과 같은 결과가 나왔다. 그림에서는 정상인(Normal), 치료 전의 환자(Patient)와 같이 도시하였는데, 두 가지 요법 즉 식사 조절 및 아침 식전 인슐린

투여를 한 경우에는 정상인과 거의 같은 수준의 혈장 포도당 수준으로 조절할 수 있음을 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있었다.



[Fig. 12] Simulation Results of the Plasma Glucose Levels under the Combined Treatments (Diet Control plus Administration of NPH Insulin at 06 Hr. )

### IV. 결론

본 연구의 시스템다이내믹스 모델을 통해 당뇨병 환자의 혈당 조절을 위한 식사 조절 및 인슐린 치료와 같은 치료 프로그램을 계수화 하는 프로그램을 제시하고자 하였다. 이러한 프로그램을 통하여 혈당을 예측할 수 있다. 이러한 가정을 할 수 있다. 즉, 모든 사람에게 적용시킬 수 있는 혈당을 정확하게 예측할 수 있는 수학적 모델이 가능하고, 각 사람마다 올바른 계수들을 계산할 수 있는 방법이 있다면 환자의 치료에 어떠한 도움이 될 수 있을까? 그 답은 당뇨병 환자가 자기 혈당 측정기를 가지고 있는 것 보다 더 큰 도움이 된다는 것이다. 회사를 경영하는 가운데, 언제 어떻게 관측활동을 하면 고객의 수가 어떻게 증가하는지 예측할 수 있는 도구를 갖고 있는 회사와 그렇지 않은 회사의 비교가 될 것이다.

그렇다면 이러한 이상적인 수학적 모델이 가능한가? 이 연구에서 결론은 수학적 모델이 가능함을 보여주고 있다. 연구에서 개발된 시스템다이내믹스 모델은 아침 6시에 식사하는 것과 6시 반에 식사하는 것까지도 구분할 수 있도록 되어 있다. 이 모델이 예측하는 값이

정확하다는 가정 하에서 그것은 당뇨병 환자에게는 획기적인 혁명이라고 할 수 있다.

문제는 이 모델이 얼마나 정확한가에 있다. 지금까지의 결론은 “당뇨병 환자의 치료요법에 따른 혈장 인슐린 반응 및 혈장 포도당 농도에 관한 일반적인 이론을 충분히 설명할 수 있을 정도로 정확하다”라는 것이다. 이 논문의 시뮬레이션 결과는 당뇨교육자 (간호사 또는 의사 등)가 일반적 당뇨병 환자 (정확한 과거의 진행 상황을 모르는)에게 식사량과 식사 시간, 운동량, 인슐린 투약 등이 얼마나 중요한지 개념적으로 설명함으로써 각 변수를 변화 시킴으로써 나타나는 바람직한 수준의 혈당치를 보임으로써 당뇨병 환자의 행위 변화를 유도하는 동기화를 목표로 하는 교육 자료로 충분하다. 그렇다면 이 모델을 소숫점 한자리까지 정확하게 예측할 수 있는 모델로 발전시키는 것이 가능한가? 그 답도 “그렇다”라고 할 수 있다. 인체의 탄수화물 대사에 대한 이론은 널리 알려져 있는 사실이고 각 개인의 차이를 설명하는 것은 모델에서 사용하는 상수의 일부이다. 이러한 상수는 일정 기간의 자료만 있으면 캘리브레이션을 통해 쉽게 얻을 수 있다.

본 연구의 시스템다이내믹스 모델링에서 부족한 점이 있다면, “당뇨병의 인슐린-혈당의 기전에 대한 모든 현상을 우리가 알고 있는가?” 라는 점이다. 모델을 개발하고 그에 맞는 자료들을 수집하는 과정에서 부족한 점이 있었다. 즉, 일부 자료(소화율, 글루코스의 글리코겐으로의 전환하는 시간 등)는 정확한 수치를 구할 수 없었다. 그러나 그 수치로 인하여 나타나는 현상에 대해서는 많은 자료가 있었다. 지금까지는 이 논문에서 제시되는 것과 같은 정도의 수학적 모델이 없는 관계로 현재의 모델에 필요한 자료를 쉽게 수집할 수 없었던 것이라고 판단된다. 따라서 수학적 모델의 중요성이 인정이 되면, 그 모델에 필요한 자료를 당뇨병 환자의 치료와 혈당조절에 관한 임상 실험을 통해서 구할 수 있을 것으로 추정할 수 있다.

시스템다이내믹스 모델을 통하여 당뇨병 환자의 혈당 예측이 가능하다고 가정하면 당뇨병 환자에서 정상에 가까운 혈당 수준을 유지함으로써 당뇨병의 만성 합병증을 최소화할 수 있다. 본 연구의 시스템다이내믹스 모델을 실제에 적용함으로써 기대하는 효과는 개인에게 적절한 치료법을 계수화 함으로써 당뇨병 환자의 치료 목표인 저혈당과 고삼투성 고혈당 상태, 혹은 당뇨병성 케톤 산혈증이라는 급성 합병증을 예방하면서 혈당을 가능한 정상 범위로 유지하고 장기적으로는 만성 합병증을 예방하고 삶의 질을 높일 수 있다.

## [ 참고문헌 ]

- 고경수 외. (2007). 5장. 제1형 당뇨병 : 24시간 연속혈당 측정 「제 3판. 단계별 당뇨병 관리」, 5-4. 서울: 대한당뇨병학회.
- 이순희. (2003). 「시스템 다이내믹스를 이용한 비만인의 에너지 균형 모델 개발」. 박사학위논문, 중앙대학교 대학원.
- American Diabetes Association (2008). Third party reimbursement for diabetes care, self-management education and supplies. Diabetes Care Vol. 31, supplement 1: S95-S96.
- Gaetano, A. D., & Arino, O. (2000). Mathematical Modeling of the intravenous glucose tolerance test. J Math Biol, Vol.40: 136-168.
- Ganong, W. F. (2008). Endocrine functions of the pancreas & regulation of carbohydrate metabolism. In 「Review of medical physiology」, accessed at <http://www.accessmedicine.com/resourceTOC.aspx?resourceID=11>
- Golin, C. E., Dimatteo, M. R., & Gerberg, L. (1996). The role of patient participation in the doctor visit. Implication for adherence to diabetes care. Diabetes Care, Vol.19, No.10: 1153-64.
- WHO & International Diabetes Center. (2007). 인슐린 단계. 「Staged diabetes management workshop」, 4-2 & 4-3. Seoul: Korean Diabetes Association, Sanofi Aventis Pharm Co., & Handok Pharm Co.
- Jameson, J. L. (2008). Chapter 332. Principles of Endocrinology. 「Harrison's internal medicine」, accessed at <http://www.accessmedicine.com/content.aspx?aID=2863377>
- Sakai, T., Ohneda, A., Nihei, J. & Kobayashi, T. (1982). Analysis of insulin secretion based on changes in plasma insulin and C-peptide in man. Tohoku J exp Med, Vol.138 : 427-440.
- Silber, H. E., Jauslin, P. M., Frey, N., Gieschke, R., Simonsson, S. H., & Karlsson, M. O. (2007). An integrated model for glucose and insulin regulation in healthy volunteers and type 2 diabetic patients following intravenous glucose provocations. J Clin Pharmacol, Vol.47 : 1159-1171.